

# 乌拉特前旗水文地质参数计算与对比分析

张楠, 梁秀娟, 肖长来, 肖霄, 乔冬晨

(吉林大学环境与资源学院, 长春 130026)

摘要: 本文根据内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗新安镇的抽水试验资料, 采用非稳定流的泰斯配线法、直线图解法、水位恢复法和全程曲线拟合法四种方法确定水文地质参数, 并对四种方法的参数结果进行了对比分析, 最终确定合理可靠的参数结果。通过分析对比发现全程曲线拟合法在四个方法中是相对可靠的方法, 它充分考虑了抽水期间和水位恢复期间的全部资料, 对理论曲线和实测曲线进行拟合, 并运用了最小二乘法原理来控制拟合结果。本次计算结果表明, 全程曲线拟合法是水文地质参数计算的一种有效方法。综述文章: 以背景、研究现状、研究用途的结构书写, 篇幅以 150~300 字左右为宜, 不用第一人称做主语, 不与正文语句重复。一般研究性文章: 以摘录要点的形式按目的、方法、结果、结论的结构报道出作者的主要研究成果, 字数在 200~400 字左右为宜, 不用第一人称做主语, 不与正文语句重复。

关键词: 乌拉特前旗; 盐卤水; 抽水试验; 水文地质参数; 全程曲线拟合法

中图分类号: P641.73

## Analysis on Hydrogeologic Parameters of Urad Front Banner

ZHANG Nan, LIANG Xiujuan, XIAO Changlai, XIAO Xiao, QIAO Dongchen

(College of Environment and Resource, Jilin University, ChangChun 130026)

**Abstract:** Based on the pumping test data of Xin'an town, Urad Front Banner of Bayinnaoer city in Inner Mongolia Autonomous Region, four methods, Theis type curve method, Straight line method, Water level recovery method and whole curve matching method were used to assess the hydrogeologic parameters. The results were compared with each other and the relatively reasonable and reliable result appeared which depended on whole curve matching method. With the least square method control the fitting results, the theoretical curves and experimental curves were fitted with, by considering the whole data of pumping and water level recovery period. It is appeared that the whole curve-fitting method is an effective means to determine hydrogeologic parameters.

**Keywords:** Urad Front Banner; Brine; pumping test; hydrogeologic parameters; whole curve matching method

## 0 引言

内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗新安镇含有丰富的盐卤水, 卤水作为一种特殊的地下水资源, 是热能利用的巨大宝库, 在社会经济发展中具有重要的工业价值。国内外常用的确定水文地质参数的方法有抽水试验法、压水试验法、注水试验法、示踪试验法、室内试验法、同位素法、数值反演法以及水化学动力学方法, 其中抽水实验法是确定水文地质参数的主要方法<sup>[1,2]</sup>。在试验含水层满足 Theis 假设的前提下, 常用的试验方案是定流量非稳定流抽水, 而分析抽水试验数据的方法多为配线法, 直线图解法, 水位恢复法和全程曲线拟合法<sup>[1,3,4,5]</sup>。因此为了对本地盐卤水资源进行合理的评价和开发利用, 在内蒙古乌拉特前旗新安镇进行了大型的抽水试验, 根据抽水试验数据采用多种求参方法计算水文地质参数, 并对各种求参方法进行对比分析确定合理可靠的参数值。

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目 (2007BAB28B04 -03; 2006BAB04A09-02; 2006BAJ08B09-01); 吉林省科技攻关项目(20080543, 20100452); 教育部高等学校博士点基金项目 (No. 200801830044)

作者简介: 张楠, (1986-), 女, 硕士研究生, 地下水科学与工程

通信联系人: 梁秀娟, (1964-), 女, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为水资源与水环境. E-mail: lax64@126.com

## 1 试验区概况

试验区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,其东起西山咀,西至西小召,南抵黄河北,北到十顶房子—新安镇一带,呈东西向分布,其长 32km,宽 3~12km,面积达 238.83km<sup>2</sup>。其处于后套平原东部,地形平坦,由西向东,由南向北倾斜,南近黄河,东靠乌梁素海,渠系甚多,河套总干渠横穿工作区西部,此外尚有引黄灌溉渠及排水渠。

河套盆地基底为元古界、太古界变质岩系,沉积盖层为第四系、第三系、下白垩统,沉积岩最厚达 16300m。试验区位于华北地台(I级构造单元)下属的鄂尔多斯台向斜(II级构造单元)的河套新断陷(III级构造单元)中的西山咀潜伏乌拉山隆起带(IV级构造单元)。

试验区形成了以细砂相为主的湖积含水层系统。含水层岩性中粒径为 0.5~0.25mm 的颗粒占 48.05%; 0.25~0.05mm 的颗粒占 23.19%; 小于 0.05mm 的颗粒占 28.72%,含水层的岩性颗粒较小,呈现出一定的粘性特征。地下水的动态类型为入渗—蒸发型,降水入渗和灌溉水入渗是其主要补给源,蒸发和排水沟排水时研究区地下水的主要排泄途径。

## 2 水文地质参数计算方法

本次试验采用的是非稳定流抽水试验,因此采用多种非稳定流计算方法计算水文地质参数,然后进行修正、比较、推荐确定水文地质参数。

### (1) Theis 配线法

泰斯(Theis)公式:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad u = \frac{r^2}{4at} = \frac{r^2 u^*}{4Tt} \quad (1)$$

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{1}{y} e^{-y} dy = -0.577216 - \ln u + u - \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^n \frac{u^n}{n \cdot n!} \quad (2)$$

式中  $s$ ——抽水影响范围内任一点任一时刻的水位降深, m;

$Q$ ——抽水井的流量, m<sup>3</sup>/d;

$W(u)$ ——泰斯井函数,有表可查;

$T$ ——承压含水层导水系数, m<sup>2</sup>/d;

$a$ ——承压含水层导压系数, m<sup>2</sup>/d;

$t$ ——自抽水开始到计算时刻的时间, d;

$r$ ——计算点到抽水井的距离, m;

$\mu^*$ ——承压含水层的贮水系数。

在此为了计算的简便和精确选择 Aquifer Test 软件来计算参数。

### (2) Jacob 直线图解法

当  $u \leq 0.01$  时,完整井 Jacob 直线图解法公式为:

$$s = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{2.25T}{\mu^*} + \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{t}{r^2} \quad (3)$$

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi i} \quad \mu^* = \frac{2.25T}{r^2} [t] \quad (4)$$

式中  $i$ ——直线斜率;其余符号意义同前。

### (3) 水位恢复法

75 利用水位恢复资料绘出  $s' - \lg \frac{t}{t'}$  曲线, 求得其直线段斜率  $i$ , 由此可以计算参数  $T$ :

$$\begin{aligned} T &= \frac{2.3Q}{4\pi[i]} = 0.183 \frac{Q}{[i]} & s_p &= \frac{2.3Q}{4\pi T} \lg \frac{2.25at_p}{r^2} \\ a &= 0.44 \frac{r^2}{t_p} 10^{-\frac{s_p}{i}} & \mu^* &= \frac{T}{a} \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $t'$  —抽水停止后经过的时间;

$t_p$ —停抽时刻的时间;

80  $s_p$ —停抽时刻水位降深,  $m$ ;

$s'$ —剩余降深,  $m$ ; 其余符号意义同前。

(4) 全程曲线拟合法<sup>[4,5]</sup>

① 抽水期间

目标函数:  $Z = \min \sum (s_m - s_c)^2$

85 约束条件为: 绝对误差  $s_m - s_c \leq \varepsilon_1$ ; 相对误差  $(s_m - s_c) / s_m \leq \varepsilon_2$ 。

式中  $s_m$ ——实测降深,  $m$ ;

$s_c$ ——计算降深,  $m$ , 给定  $T$  和  $\mu^*$  后利用公式 (1) 和 (2) 确定;

$\varepsilon_1$ ——降深绝对误差允许值,  $m$ ;

$\varepsilon_2$ ——降深相对误差允许值, %。

90 ② 水位恢复期间

目标函数:  $Z = \min \sum (s'_m - s'_c)^2$

约束条件为: 绝对误差  $s'_m - s'_c \leq \varepsilon_1$ ; 相对误差  $(s'_m - s'_c) / s'_m \leq \varepsilon_2$ 。

水位恢复试验期间, 剩余降深计算公式为

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) - W(u')] \quad (6)$$

$$95 \quad u' = \frac{r^2}{4at} = \frac{r^2 u^*}{4Tt'} \quad (7)$$

$$t' = t - t_p \quad (8)$$

式中  $s'_m$ ——实测剩余降深,  $m$ ;

$s'_c$ ——计算剩余降深,  $m$ , 采用前述的给定  $T$  和  $\mu^*$  后利用公式 (7) ~ (9) 确定;

$\varepsilon_1$ ——降深绝对误差允许值,  $m$ ;

100  $\varepsilon_2$ ——降深相对误差允许值, %; 式中其余符号含义同前。

计算过程可使用 Excel 电子表格完成, 不断调整  $T$  和  $\mu^*$ , 使水位降深实测值与计算值的误差平方和最小或抽水试验理论曲线与实测曲线拟合最佳, 则此时的  $T$  和  $\mu^*$  值即为所求。

### 3 计算结果与分析

在本实验区内共有 49 个抽水孔, 本次以 18 号孔、24 号孔和 37 号孔为例进行实例计算。

105 各井参数见表 1。

表 1 单孔抽水井主要参数一览表  
Tab. 1 Main parameter list of single-hole pumping Wells

井号	井深(m)	管径(mm)	含水层厚度 (m)	涌水量 (m <sup>3</sup> /d)	岩性
18	31.00	108	10.30	175.392	细砂
24	42.00	108	29.00	175.392	细砂+粉砂
37	30.00	108	9.90	69.120	粉砂

所用方法及所求参数结果见表 2。

从所求参数结果可以看出各抽水井计算的渗透系数值均介于粉砂与细砂渗透系数的经验值 1~15 之间，从统计角度看结果是合理的。此外某些文献指出，大部分承压含水层的储水系数  $\mu^*$  在  $10^{-3}$  到  $10^{-5}$  之间<sup>[6]</sup>，因此这三个抽水井的储水系数  $\mu^*$  均在合理的范围之内。这四种方法所求结果存在一定偏差，除个别方法的计算结果偏大以外，其他各方法的计算结果都很接近，因此可以看出水文地质参数的计算结果是可靠的，故可用四种方法的参数平均值（差异较大值舍弃）作为最后的参数计算结果既可。

表 2 单孔抽水井求参结果一览表  
Tab. 2 Parameter results list of single-hole pumping Wells

井号	计算方法	导水系数 $T/(m^2/d)$	渗透系数 $K/(m/d)$	储水系数 $\mu^*$
18 号井	Theis 配线法	33.20	3.22	0.000015
	Jacob 直线图解法	34.21	3.32	
	水位恢复法	92.99	9.03	
	全程曲线拟合法	33.6	3.26	0.000042
	参数平均值（扣除差异较大值后）	<b>33.67</b>	<b>3.26</b>	<b>0.000029</b>
24 号井	Theis 配线法	48.60	1.68	4.47E-06
	Jacob 直线图解法	96.75	3.34	0.0053
	水位恢复法	44.59	1.54	
	全程曲线拟合法	45.00	1.55	0.000074
	参数平均值（扣除差异较大值后）	<b>46.06</b>	<b>1.59</b>	<b>0.0019</b>
37 号井	Theis 配线法	17.20	1.43	0.00047
	Jacob 直线图解法	19.40	1.96	
	水位恢复法	14.05	1.42	0.00096
	全程曲线拟合法	17.00	1.72	
	参数平均值（扣除差异较大值后）	<b>16.91</b>	<b>1.63</b>	<b>0.00072</b>

现将各方法所求的导水系数与各井平均值的偏差比例列表如下（见表 3）：

表 3 各井导水系数与平均值的偏差比例表（%）  
Tab. 3 Scale of transmissivity and average deviation （%）

	18 号井	24 号井	37 号井
Theis 配线法	1.4%	5.5%	1.7%
Jacob 直线图解法	1.6%	舍弃	14.7%
水位恢复法	舍弃	3.2%	16.9%
全程曲线拟合法	0.2%	2.3%	0.5%

现综合表 2、表 3 对这四个方法进行对比分析：

（1）Theis 配线法：此方法所求的参数结果比较稳定，在三个井的计算中都没有出现偏差较大的结果。泰斯配线法的最大优点是可以充分利用抽水试验的全部观测资料，避免个别资料的偶然误差，提高计算精度，但也存在实际曲线和标准曲线不容易拟合准确的缺点<sup>[3]</sup>，即配线的时候具有随意性，从而导致求解的参数值误差较大。但总体看该方法的应用没有太大的限制且计算的参数结果较稳定准确。

(2) Jacob 直线图解法: 此方法所求的参数结果较不稳定, 易出现误差较大值, 并且在 37 号井中与平均值的偏差较大。直线图解法不但简单易懂而且能避免配线法的随意性, 但该方法使用时是有条件的, 即当  $u \leq 0.05$  时才可使用该方法, 满足此条件才可能出现直线段, 直线段占据的时段要小于试验的延续时段, 使得观测数据不能充分利用, 代表性相应降低。尤其当抽水试验后期含水层外围的非泰斯条件的干扰, 使直线段更加模糊不清, 甚至可能在整个抽水试验期间也不出现直线段, 这就加大了求参的难度。因此只有在  $r$  较小, 而  $t$  值较大的情况下才能使用。否则, 抽水时间短, 直线斜率小, 截距值小, 所得的  $T$  值偏大。

(3) 水位恢复法: 此方法所求的参数结果也不稳定, 也易出现误差较大值。由于抽水流量的轻微波动所造成的降深变化在水位恢复期间不存在, 所求水文地质参数不受流量等因素的影响, 所以其  $s' - \lg \frac{t}{t'}$  曲线比较规则。但如果  $s' - \lg \frac{t}{t'}$  曲线不出现直线段的情况下则无法较准确地求取参数值。此外该方法还受到井筒储水量的影响, 当停止抽水时储存在井筒内的水量迅速回到井中, 导致水位恢复较快, 从而会影响参数的可靠性。

(4) 全程曲线拟合法: 此方法在四个方法中与平均值的偏差比例最小, 而且没有出现偏差较大的结果, 说明此方法所求的参数结果是最稳定的。全程曲线拟合法充分考虑了抽水过程中水位快速下降段、水位缓慢下降段和水位恢复段的观测资料, 对理论曲线和实测曲线进行拟合, 并运用了最小二乘法原理控制拟合结果, 使计算的水位过程线与抽水过程的实测曲线最佳拟合 (见图 1)。此方法充分利用了抽水期间和水位恢复期间的全部观测资料, 并可适当剔除个别异常点, 在实测降深与计算降深误差平方和最小的情况下, 保证了所求得的含水层参数值的唯一性和可靠性。因此在这四种方法中全程曲线拟合法是相对最合理而且最可靠的方法。

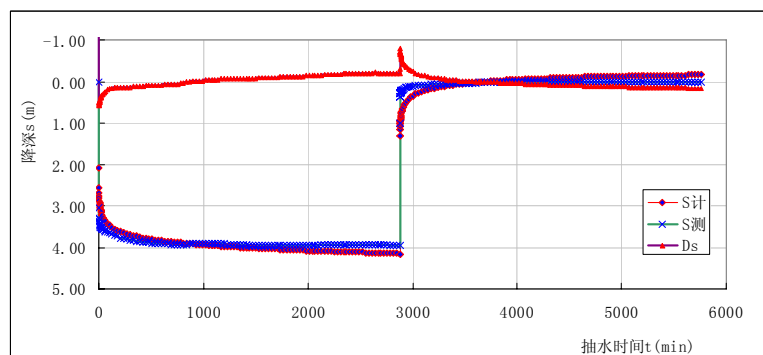


图 1 24 号井全程曲线拟合法降深-时间曲线图  
Fig. 1 Drawdown - time curves of whole curve matching method

从图 1 还可得出以下结论:

(1) 可以看出在抽水试验阶段和水位恢复阶段中水位稳定都较快 (其他井均如此, 在此不一一列举), 从而知道该地区的导水性和补给条件较好。对于 24 号孔, 其含水层底部有 2.8m 的粉粘土, 因此在抽水时含水层的主要补给来源为越流补给。

(2) 图中蓝线为实测降深, 红线为理论降深, 在抽水试验阶段初期, 蓝线在红线的下方, 即实测降深大于理论降深, 这是由于井中过滤器的存在产生了井损, 使得井管外面的水头高于井管内的水头。但由于产生的井损较小, 在此次参数计算中不考虑井损的影响。



## 4 结语

利用非稳定流的泰斯配线法、Jacob 直线图解法、水位恢复法和全程曲线拟合法同时计算含水层的水文地质参数,通过对比分析避免了单种方法的偶然性、随意性,综合得出的水文地质参数的结果作为新安镇盐卤水的评价利用的依据是十分可靠的。其中全程曲线拟合法的

170 的计算结果相较其他方法各加稳定,并具有以下特点:

(1) 全程曲线法充分利用了抽水试验和水位恢复试验的全部数据,避免个别数据的偶然误差;

(2) 全程曲线拟合法采用了最小二乘法原理对理论曲线和实测曲线进行拟合,在理论上使结果更加可靠;

175 (3) 全程曲线拟合法速度快、精度高、求参结果最优,即适用于承压含水层求参,又可推广到潜水含水层求参。

## [参考文献] (References)

- 180 [1] 肖长来,梁秀娟,崔建铭.用全称曲线拟合法确定承压含水层参数的研究[J].水利水电技术,2005 (05): 22-26.  
XIA C L, LIANG X J, CUI J M. Study on determination of parameters for confined aquifer with W hole Curve-Matching Method[J]. Water Resource and Hydropower Engineerin, 2005 (05): 22-26.
- [2] 肖长来,梁秀娟,崔建铭.确定含水层参数的全程曲线拟合法[J].吉林大学学报,2005 (6): 751-755.  
185 XIA C L, LIANG X J, CUI J M. Whole Curve Matching Method for Aquifer Parameters Determination[J]. Journal of Jilin University, 2005 (6): 751-755.
- [3] 刘天霸,石建省,张翼龙,等.基于最频值法直线图解水文地质参数[J].工程勘察,2010 (3) 42-45.  
LIU T B, SHI J S, ZHANG Y L, et al. Solving hydrogeologic parameters by linear graphic approach based on the most frequent value method[J]. Geotechnical Investigation & Surveyin, 2010 (3) 42-45.
- [4] 吴家杰,史丽娜.非稳定流方法计算水文地质参数[J].西部探矿工程,2010 (1): 140-141.  
190 WU J J, SHI L N. Determination of hydrogeology parameters with unsteady flow[J]. Western Exploration Engineering, 2010 (1): 140-141.
- [5] 李莲花,张建斌,张连胜,等.濮阳市地热资源分析及水文地质参数计算[J].河南地质,2001 (04): 314-316.  
LI L H, ZHANG J B, ZHANG L S, et al. Geothermal resources analysis and determination of hydrogeology parameters of Puyang city[J]. Henan Geological, 2001 (04): 314-316.
- 195 [6] 薛禹群,朱学愚,吴吉春,等.地下水动力学[M].北京:地质出版社,1997.  
XUE Y Q, ZHU X Y, WU J C, et al. Groundwater dynamics[M]. Beijing: Geological publishing house, 1997.
- [7] 常安定,刘元会,马良.用割离井公式反求水文地质参数的图解法[J].西安科技大学学报,2006 (2): 204-207.
- 200 [8] 聂庆林,高广东,轩华山等.抽水试验确定承压含水层参数方法探讨[J].水文地质工程地质,2009 (4): 37-41.  
NIE Q L, GAO G D, XUAN H S, et al. Study on determination of parameters for confined aquifer with pumping test[J]. Hydrological Geology Engineering Geology, 2009 (4): 37-41.
- 205 [9] Mukhopadhyay A. Spatial estimation of transmissivity using artificial neural network[J]. GROUND WATER, 1999, 03.
- [10] Birpinar ME. Aquifer parameter identification and interpretation with different analytical methods. WATER SA, 2003, 03.
- 210 [11] Yeh HD, Huang YC. Parameter estimation for leaky aquifers using the extended Kalman filter, and considering model and data measurement uncertainties[J]. JOURNAL OF HYDROLOGY, 2005, 1-4.